郭春涛,史江涛,刘亮,等. 塔里木盆地塔河地区中下奥陶统沉积特征及其演化模式.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(1):68-82. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220206.

Guo Chuntao, Shi Jiangtao, Liu Liang, et al. Sedimentary Characteristics and Evolution Model of Middle and Lower Ordovician in Tahe Area, Tarim Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(1):68-82. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220206.

塔里木盆地塔河地区中下奥陶统沉积特征及其演化模式

郭春涛[1,2],史江涛[1,2],刘 亮[1,2],荆雪婷[1,2],刘杨晋[3]

1.山西工程技术学院矿区生态修复与固废资源化厅市共建山西省重点实验室培育基地,山西 阳泉 045000

2.山西工程技术学院地球科学与工程系,山西 阳泉 045000

3.山西国辰建设工程勘察设计有限公司,山西 阳泉 045000

摘要:沉积环境对岩溶型储层的发育起着基础性作用,影响着岩溶体的规模和强度,加强沉积环境研究有助于优质岩溶储层的勘探与预测。为深入认识塔河地区中下奥陶统沉积特征,在野外调查基础上,结合岩石颜色、类型、组合、结构、构造、古生物、地球化学特征等岩石学和岩相学标志,利用岩心、测录井、地震和区域宏观沉积资料,对中下奥陶统沉积环境进行了精细识别和划分。结果显示,研究区岩石类型主要为颗粒灰岩、泥晶灰岩、生物灰岩和过渡岩类;共发育5种沉积环境,蓬莱坝组以局限—半局限台地为主,鹰山组以半局限台地、开阔台地为主,一间房组以开阔台地、台地边缘、淹没台地为主;共发育11种地震相,与各类沉积相带具有较明显的对应关系。总的来说,研究区以台地相为主,时空演化差异明显。纵向上,自蓬莱坝组至一间房组沉积水体逐渐加深,沉积环境由局限逐渐变为开阔;横向上,研究区主体以开阔台地、台地边缘为主,向东、向南至研究区外部逐渐过渡为斜坡、盆地相。综合前人资料,建立了研究区自下奥陶统蓬莱坝组局限台地→半局限台地→中下奥陶统鹰山组开阔台地→中奥陶统一间房组台地边缘→一间房组晚期、吐木休克组淹没台地的演化模式。

关键词:塔河地区;中下奥陶统;沉积环境;地震相;演化模式

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220206 **中图分类号**:TE122.2 **文献标志码**:A

Sedimentary Characteristics and Evolution Model of Middle and Lower Ordovician in Tahe Area, Tarim Basin

Guo Chuntao[1,2], Shi Jiangtao[1,2], Liu Liang[1,2], Jing Xueting[1,2], Liu Yangjin[3]

收稿日期:2022-07-12

作者简介:郭春涛(1981—),男,副教授,博士,主要从事沉积学方面的研究,E-mail:xinylx521@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41802171);山西省高等学校科技创新项目(2021L590);山西省基础研究计划(202203021211287)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41802171), the Science and Technology Innovation Project of Colleges and Universities in Shanxi Province (2021L590) and the Fundamental Research Program of Shanxi Province (202203021211287)

1. *The Cultivation Base of Shanxi Key Laboratory of Mining Area Ecological Restoration and Solid Wastes Utilization, Shanxi Institute of Technology, Yangquan* 045000, *Shanxi, China*
2. *Department of Earth Sciences and Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan* 045000, *Shanxi, China*
3. *Shanxi Guochen Construction Engineering Survey and Design Co., Ltd., Yangquan* 045000, *Shanxi, China*

Abstract: The environment plays a fundamental role in the development of karst reservoirs and affects the scale and strength of karst bodies. Strengthening the study of sedimentary environments can be beneficial to the exploration and prediction of high-quality karst reservoirs. In order to deeply understand the sedimentary characteristics of the Middle and Lower Ordovician in Tahe area, the sedimentary environment is finely identified and divided by using core, logging, seismic and regional macro-sedimentary data on the basis of field survey. At the same time, the petrological and petrographic indicators, such as rock color, type and combination, structure, paleontology, geochemical characteristics, and so on, are also used to identify sedimentary environments. The results show that the rock types in the study area are mainly granular limestone, micritic limestone, biological limestone and transitional rocks. There are five types of sedimentary environments developed in total. The Penglaiba Formation is dominated by restricted and semi-restricted platform, and the Yingshan Formation is dominated by semi-restricted platform and open platform, while the Yijianfang Formation is dominated by open platform, platform margin and submerged platform. A total of 11 seismic facies are developed, which have an obvious corresponding relationship with various sedimentary facies. In general, the study area is dominated by platform facies, with obvious differences in space-time evolution. Vertically, the sea waterbody gradually deepens from the Penglaiba Formation to the Yijianfang Formation, and the sedimentary environment gradually changes from restricted to open platform. Laterally, the main body of the study area is dominated by open platform and platform margin, and gradually transits to slope and basin facies from east and south to the outside of the study area. Based on previous data, the evolution model of the study area is established. This model shows that the sedimentary environment has evolved gradually from restricted platform of the Lower Ordovician Penglaiba Formation → semi-restricted platform → open platform of the Middle and Lower Ordovician Yingshan Formation → platform margin of the Middle Ordovician Yijianfang Formation → submerged platform of the late Yijianfang Formation and the Tumuxiuke Formation.

Key words: Tahe area; Middle and Lower Ordovician; sedimentary environment; seismic facies; evolution model

0　引言

岩溶型碳酸盐岩储层广泛分布于我国四川盆地、渤海湾盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地等[1-3]。因其储量大、产量高等特点，一直是海相油气勘探的重点，并相继在多个盆地取得突破[3-4]。塔河油田碳酸盐岩油气藏最具代表性，已累计产原油突破 1×10^8 t，是我国目前已发现的石油储量最大、原油产量最高的古生界海相碳酸盐岩油田。近年来，塔北地区岩溶型碳酸盐岩储层勘探不断取得新进展[4-6]，证实其仍有较大的资源潜力。然而，由于沉积环境的差异性、成岩流体的多期性、构造演化的复杂性、岩石物性的非均质性、岩溶作用的叠加性等，导致储层类型多样、成因机制复杂、非均质性强等，进而造成优质岩溶型储层预测和评价困难[2-4]。

前人对岩溶型碳酸盐岩储层的形成机理、控制因素进行了多方面研究[6-13]，总的来讲，岩溶型储层的形成受控于沉积环境、断裂体系、古地理古地貌、白云岩化、热液作用、海平面变化、成岩作用等多方面[14-19]。而对塔河地区中下奥陶统，前人尤其强调沉积环境的基础性作用，沉积相带、岩石类型控制着同生岩溶、表生岩溶的发育规模和强度[7-8, 10, 14, 17]。此外，近几年塔河地区内幕型储层勘探取得新进展，内幕型储层的发育往往与沉积环境、岩石类型、沉积间断等密切相关[20-21]。因此，研究塔河地区奥陶系沉积环境及演化，能显著有利于碳酸盐岩储层的勘

探与预测。

为此,本文在前人工作基础上,基于岩心、薄片、钻井、录井、地震等资料,对塔河地区中下奥陶统碳酸盐岩进行再认识,分析其岩石学特征、沉积标志、地震特征等,重点对沉积环境和纵横向展布与演化进行研究,明确其时空分布规律,建立中下奥陶统沉积演化模式,再现早中奥陶世塔北地区纵横向的沉积充填序列及演化,为进一步油气勘探提供地质依据。

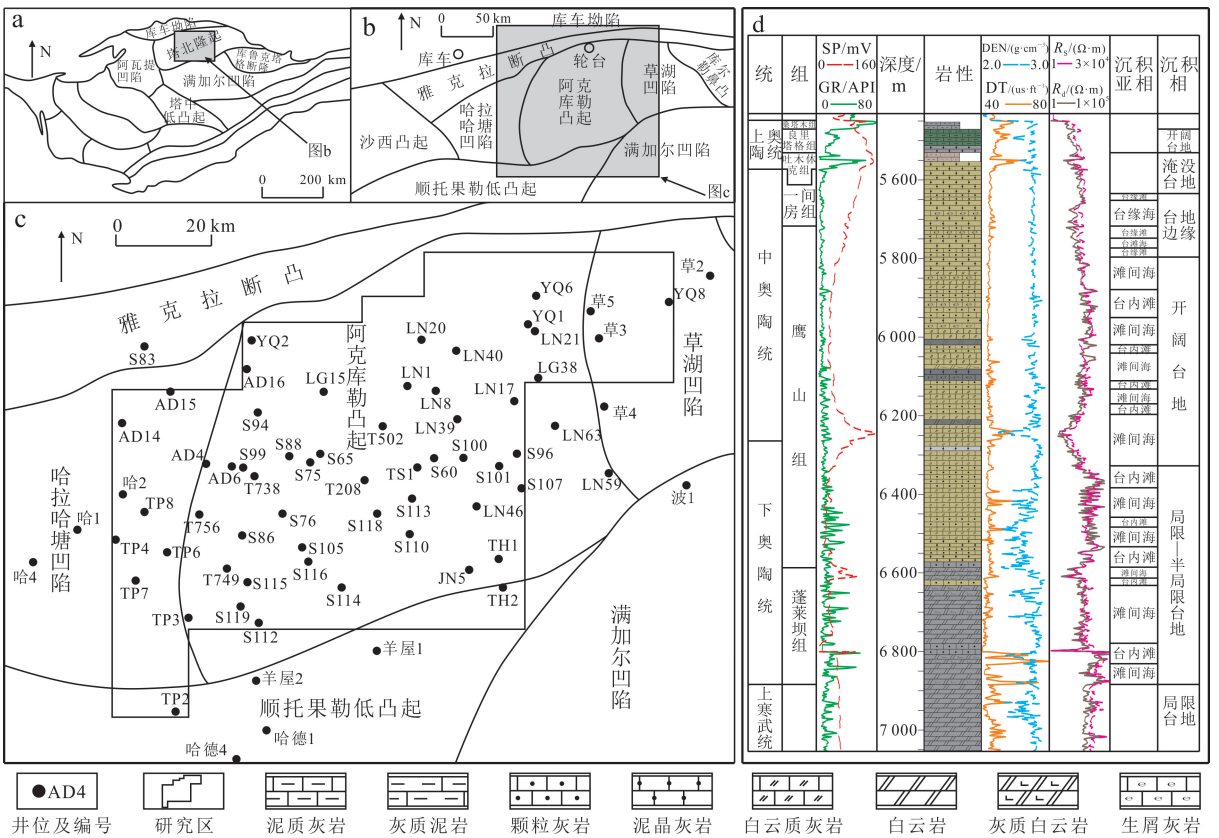
1 地质背景

塔河地区位于塔里木盆地塔北隆起南缘,北接雅克拉断凸,西临哈拉哈塘凹陷,南部与顺托果勒低凸起相望,东边是草湖凹陷,构造上大部分属于阿克库勒凸起(图1a、b、c)。阿克库勒凸起形成于加里东中期,整体上为呈现北东向南西倾伏的鼻状凸起[11],面积约6 600 km^2。

塔河地区中下奥陶统主要发育蓬莱坝组、鹰山组、一间房组(图1d)。蓬莱坝组岩性主要为颗粒灰岩、灰质白云岩及白云岩,还含有少量的白云质灰岩、藻白云岩、泥质灰岩、灰质泥岩等[22-24](图1d),大多井没有钻遇(穿)该层。鹰山组岩性以颗粒灰岩、泥晶灰岩、生屑灰岩、白云质灰岩为主[24-26],还含有少量的白云岩、灰质白云岩,下部含云质,钻井大多仅揭露100多m。一间房组岩性主要为颗粒灰岩、泥晶灰岩、生屑灰岩等[24, 27-29](图1d),平均厚度约105 m。

研究区上奥陶统自下而上依次为吐木休克组、良里塔格组、桑塔木组(图1d)。吐木休克组以棕灰色泥晶灰岩、紫红色瘤状灰岩为主,总厚度小于50 m。良里塔格组下部主要为泥晶灰岩、泥质灰岩,夹少量生屑灰岩、砂屑灰岩,上部主要发育亮晶颗粒灰岩、生物礁灰岩、泥晶灰岩、藻灰岩[24, 30],由于遭到不同程度的剥蚀,最大厚度约110 m。桑塔木组主要以泥岩、钙质泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩夹灰岩、泥质灰岩为主,厚度0~650 m。

前奥陶纪,塔里木盆地处于南北向拉张状态,塔北地区发育一系列正断层,是塔西台地的一部



SP. 自然电位; GR. 自然伽马; DEN. 补偿密度; DT. 声波时差; R_s. 浅侧向电阻率; R_d. 深侧向电阻率。ft(英尺)为非法定计量单位,1 ft=0.304 8 m,下同。

图1 研究区地质简图(a、b、c)及TS1井柱状图(d)

Fig.1 Geological diagram of the study area (a, b, c) and column diagram of Well TS1 (d)

分[31-32]，表现为一个向南倾斜的宽缓的大型斜坡。晚寒武世—早奥陶世，盆地构造性质由拉张转向挤压[32-33]，发育少量逆断层，阿克库勒凸起仍然不明显。中奥陶世之后，盆地南侧发生碰撞造山，盆地内被大面积抬升，盆内隆坳格局初现，塔北隆起开始形成雏形，部分正断层反转逆冲[30, 34]。晚奥陶世盆地格局继续分异，塔北地区小幅抬升，整体表现为水下隆起，阿克库勒凸起则表现为水下鼻凸。晚奥陶世末—志留纪，受南天山洋俯冲影响，盆地整体开始抬升，沉积环境由海相逐渐变为海陆交互相[32]，阿克库勒凸起北部大幅抬升达数百米[32, 34]，由北东向南西倾伏的鼻凸初具规模。中晚志留世—泥盆纪，盆地受南北向挤压，广泛发育大型角度不整合，导致上覆地层与下伏不同层位接触[32]，同时奥陶系碳酸盐岩发生强烈溶蚀[6-11]。

2　岩石学特征

岩相特征是识别沉积相最直接和最有效的标志之一，也是最容易观察和获取的沉积环境参数。通过 30 多口井详细观察和描述，认为研究区岩石类型主要为颗粒灰岩、泥晶灰岩、生物灰岩、过渡岩类[24-28, 34-35]（图 2），还有少量的白云岩、硅质岩、硅质（化）灰岩、瘤状灰岩、岩溶角砾岩等[24-28, 34]，在溶洞、裂缝等空间发育少量的泥岩、细碎屑岩及黄铁矿。

塔河地区中下奥陶统颗粒灰岩最为发育，包括亮晶颗粒灰岩（图 2a）和泥晶颗粒灰岩（图 2b），颗粒主要是内碎屑（砾屑、砂屑、粉屑等），其次是生物碎屑（棘屑、腕足屑、介屑、藻屑等），另有部分藻粒、鲕粒、球粒等（图 2c），颗粒灰岩占比为 43.2%。颗粒分选和磨圆较好，粒间多为方解石充填，局部混有少量陆源粉砂或泥质。颗粒灰岩反映出高能的沉积水动力条件，常见于鹰山组上部和一间房组。

研究区泥晶灰岩也非常发育，包括颗粒泥晶灰岩（图 2d）、泥晶灰岩等（图 2e），占比为 39.6%。颗粒主要为生物碎屑、球粒、砾屑、砂屑、粉屑等，所含生物碎屑个体相对完整。颗粒直径一般小于 0.3 mm，由泥晶基质支撑，部分泥晶后期发生重结晶（图 2d、e）。泥晶灰岩形成于水体能量较低环境，常见于蓬莱坝组、鹰山组下部。

生物灰岩主要包括藻灰岩、生屑灰岩等（图 2f、g），以藻灰岩最为普遍，薄层至厚层状，生物体积分数一般在 70%以上。生物种类繁多，常见的有腕足类、头足类、棘皮类、苔藓虫、介形虫、腹足类、藻类等。生物灰岩常形成于生物丘、生屑滩、礁等环境，常见于一间房组、鹰山组上部。

过渡岩类主要为白云岩与灰岩之间的过渡类型（图 2h）。过渡岩类晶体大多以他形、半自形为主，几乎不含生物，偶见介形虫屑，可见雾心亮边、重结晶等特征（图 2i）。过渡岩类主要是灰岩白云化不彻底形成的，大多分布于裂缝、断层、缝合线等附近。常见于研究区下部的蓬莱坝组和鹰山组下段。

3　沉积相类型及特征

前人已对塔里木盆地和塔北地区的沉积体系进行了较多研究[22-25, 27-36]。在此基础上，本文基于 30 多口探井、100 多口开发井的录井、岩心、普通薄片、铸体薄片等资料，依据岩石颜色、类型及组合、结构、构造、古生物、地化特征等标志，结合地震、测井及区域宏观沉积格局，对中下奥陶统沉积相进行精细识别和划分，共识别出局限—半局限台地、开阔台地、台地边缘、淹没台地、斜坡等 5 种沉积环境[22, 24-25, 34-39]。结果显示，研究区主体区域蓬莱坝组以局限—半局限台地为主，鹰山组以半局限台地、开阔台地为主，一间房组以开阔台地、台地边缘、淹没台地为主[22, 24-25, 34-39]，在研究区边部及周边可能发育斜坡环境。

3.1　局限—半局限台地

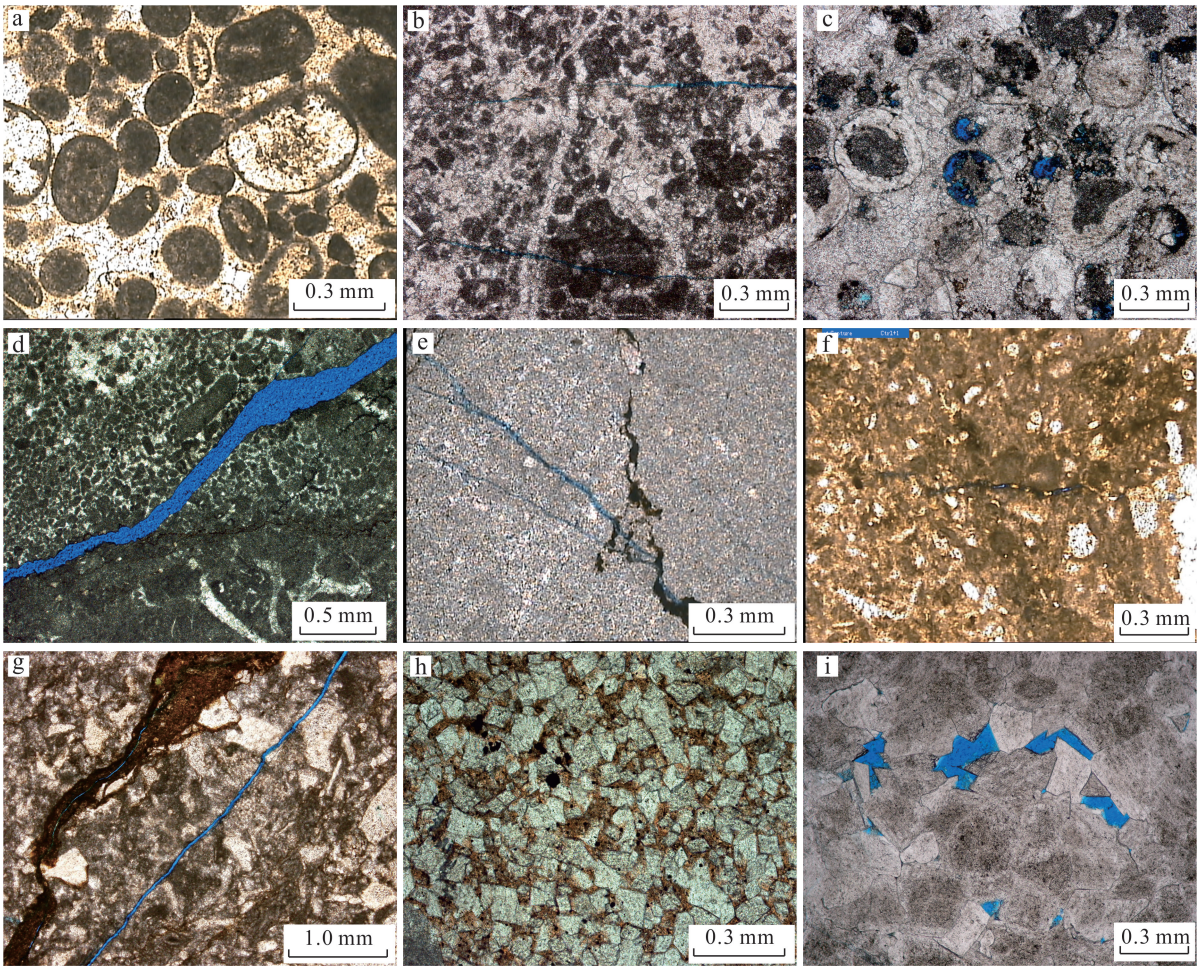
局限—半局限台地水体较浅，能量不高，盐度较高，生物种类单调、稀少，主要以低能沉积为主[34]，局部可能出现高能环境[22-23, 34]。可进一步分为台内滩、滩间海等亚相（表 1、图 3）。

局限—半局限台地主要发育于蓬莱坝组和鹰山组下部。该时期研究区海平面总体较低，局部间歇性暴露，岩性主要为白云岩、灰质白云岩、白云质泥晶灰岩、泥晶灰岩、泥灰岩等，局部发育颗粒灰岩，沉积环境以低位域局限—半局限台地为主[22-23, 34]（图 1d）。岩石常发育泥晶、粉晶结构，自形程度差，发育鸟眼构造（图 3a、b），沉积构造上，可见水平层理，生物稀少，偶见生物潜穴。

3.2　开阔台地

开阔台地水体深度较小且能量较强，沉积物类型多样（表 1），生物分异度和数量较为丰富。岩性以高能沉积为主（表 1，图 3c、d），含多种破碎的生物化石。可进一步分为台内滩、滩间海等亚相（表 1）。

开阔台地环境主要发育于鹰山组上部、一间房组[25, 27-29, 34]。其中，台内滩位置较高，水体能量较



a. S119井,6 092.43 m,一间房组,亮晶颗粒灰岩,颗粒分选磨圆较好,部分颗粒后期发生重结晶;b. S110井,6 258.00 m,一间房组,泥晶颗粒灰岩,颗粒主要为砂屑、极细砂屑,部分发生重结晶,见两条未充填裂缝和多条充填裂缝;c. S110井,6 314.42 m,一间房组,亮晶鲕粒灰岩,部分基质发生重结晶,鲕粒多见后期改造,如溶蚀、重结晶等;d. AD14井,6 700.61 m,鹰山组,含颗粒泥晶内碎屑灰岩,部分基质发生重结晶,见3条延伸短、充填方解石的微裂缝,见一条较宽未充填裂缝,见3条缝合线,其内含黑褐色沥青质;e. S115井,6 155.51 m,鹰山组,泥晶灰岩,见少量白云石,见两条未充填裂缝和一条沥青充填裂缝,部分泥晶发生重结晶;f. AD6井,6 090.10 m,一间房组,藻灰岩,发育半充填裂缝;g. S116井,6 063.46 m,一间房组,生屑灰岩,见有机质和黏土充填的缝合线,发育未充填裂缝;h. AD16井,6 556.16 m,鹰山组,粉—细晶灰质白云岩,晶形完好,自形为主,晶体表面基本干净;i. YQ6井,7 061.15 m,蓬莱坝组,粗—中晶白云岩,晶体以半自形、他形为主,见雾心亮边结构,见晶间孔及晶间溶孔。

图2 研究区中下奥陶统岩性显微镜下特征

Fig.2 Microscopic characteristics of lithology of Middle and Lower Ordovician in the study area

强,岩性以藻灰岩、鲕粒灰岩、生屑灰岩、亮晶颗粒灰岩为主,常发育正韵律,颗粒分选磨圆均中等到好。塔北地区台内滩亚相一般呈点状、片状分布。滩间海环境位置较低,水体能量较弱,岩性以泥晶灰岩、含颗粒泥晶灰岩、藻灰岩、瘤状灰岩为主,常呈中厚层状产出,发育水平层理、斜层理、生物扰动构造等,镜下常具泥晶、粉晶结构(图2d,e)。

3.3 台地边缘

台地边缘波浪作用强烈,水体能量高,常形成纯净的碳酸盐岩砂堆积,分选较好,颗粒类型丰富。生物破碎,种类多样。可进一步分为台缘滩、台缘海两个亚相(表1)。

研究区台地边缘主要发育于一间房组[27-29, 34](图1d)。其中,台缘滩亚相沉积物较纯净,以颗粒灰岩为主,如亮晶砂屑灰岩、鲕粒灰岩、砾屑灰岩、藻灰岩、生屑灰岩等,见块状构造,颗粒分选较好,磨圆度好,整体上反映出高能的水动力条件,如AD16、S116井(图3f,g)。台缘海亚相水体较深,水体能量较低,主要岩石类型为泥晶灰岩、含砂屑泥晶灰岩、泥质灰岩等(图3e)。

表 1　研究区沉积相发育类型及特征

Table 1　Types and characteristics of sedimentary facies in the study area

沉积相	亚相	岩石类型	沉积构造	生物化石	水体特征	层位
局限—半局限台地	台内滩	白云岩、灰质白云岩、白云质泥晶灰岩、泥晶灰岩、泥灰岩等，局部有高能的颗粒灰岩	泥晶、粉晶结构；自形程度差，发育鸟眼构造；可见水平层理	生物种类单调、稀少，偶见生物潜穴	水体较浅，能量不高	蓬莱坝组、鹰山组下部
	滩间海	白云岩、灰质白云岩、白云质泥晶灰岩、泥晶灰岩、泥灰岩等				
开阔台地	台内滩	藻灰岩、鲕粒灰岩、生屑灰岩、亮晶颗粒灰岩为主	发育粒序层理、斜层理、生物扰动构造等；一般呈点状、片状分布	含多种破碎的生物化石	水体较浅且能量较强，海水可以自由交换，波浪、潮汐作用强烈	鹰山组上部、一间房组
	滩间海	泥晶灰岩、含颗粒泥晶灰岩、藻灰岩、瘤状灰岩为主	常呈厚层产出，发育水平层理、斜层理、生物扰动构造等，镜下具泥晶、粉晶结构			
台地边缘	台缘滩	沉积物较纯净，以颗粒灰岩为主，如亮晶砂屑灰岩、鲕粒灰岩、砾屑灰岩、藻灰岩、生屑灰岩等	见块状构造，颗粒分选较好，磨圆度好，整体上反映出高能的水动力条件	生物破碎，种类多样	波浪作用强烈，水体能量高	一间房组
	台缘海	泥晶灰岩、含砂屑泥晶灰岩、泥质灰岩等	镜下常具泥晶、粉晶结构；见水平层理、斜层理	生物种类多，相对完好		
淹没台地		低能环境的泥质灰岩、泥晶灰岩、钙质泥岩、泥岩，部分层段发育风暴沉积	发育正韵律、水平层理、斜层理	生物相对完好，种类多样	位于浪击面以下，水动力条件较弱	一间房组上部、吐木休克组
斜坡		泥质灰岩、泥晶灰岩、泥岩	以低能环境下的水平层理、块状层理为主，可见的沉积构造有粒序层、水平纹层、波状纹层等	生物活动较少，生物分异度较差	水动力条件很弱	一间房组上部、吐木休克组

3.4　淹没台地

淹没台地水动力条件较弱，沉积物类型与开阔台地相似，但细粒含量更高。生物相对完好，种类多样（表 1）。

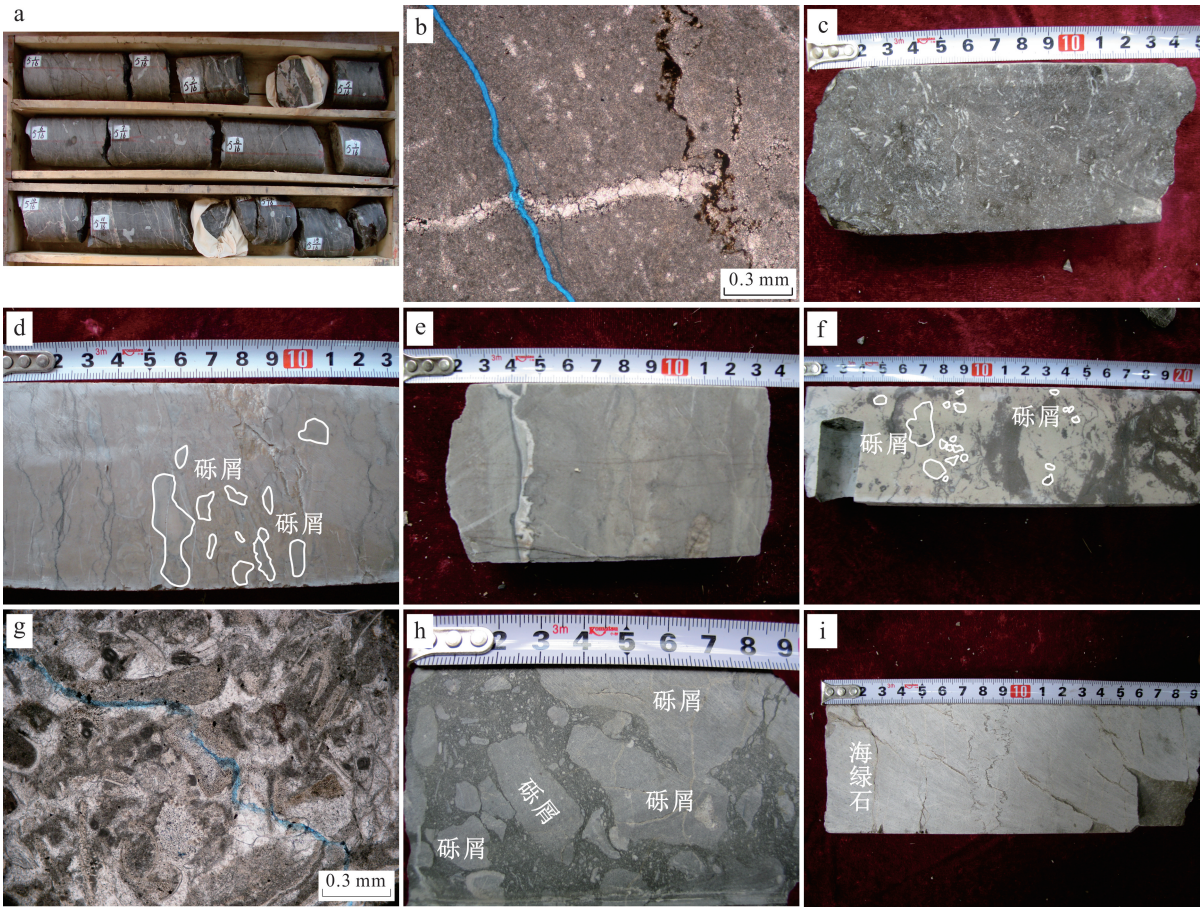
研究区淹没台地主要发育于一间房组上部、吐木休克组[33, 36-37]（图 1d）。岩性主要为代表低能环境的泥质灰岩、泥晶灰岩、钙质泥岩、泥岩，部分层段发育风暴沉积（图 3h），部分含海绿石（图 3i），发育正韵律、水平层理、斜层理，总体上反映出水进的沉积序列。

3.5　斜坡

斜坡相介于最大浪基面和氧化界面之间。水动力条件很弱，主要沉积泥质灰岩、泥晶灰岩、泥岩，沉积构造以低能环境下的水平层理、块状层理为主，可见的沉积构造有粒序层、水平纹层、波状纹层等（表 1）。塔北地区斜坡相主要发育于一间房组上部、吐木休克组，平面呈窄的条带状，沿草 2 井—满参 1 井—若羌一带呈向西凸出的窄条状马蹄形分布[24, 28, 33-34, 36-37]，在研究区分布较少，主要依据地震资料而确定其展布。

4　地震相特征

不同沉积环境形成的地层具有不同的岩性、孔隙结构、纵横向组合，在地震剖面上的外形、振幅、频率和连续性不同，因此可根据地震反射特征间接识别沉积相带。地震相主要包括地震属性和地震反射构型两个方面。研究区地震属性主要用振幅和连续性表征，而地震反射构型主要包括席状、平行—亚平



a. YQ6井,7 313.20～7 316.15 m,蓬莱坝组,粉晶白云岩,发育鸟眼构造,不发育生物化石,发育多条低角度充填或未充填裂缝,岩石坚硬致密,滩间海亚相;b. YQ1井,5 996.32 m,鹰山组,厚层泥晶灰岩,发育缝合线、充填裂缝和未充填裂缝,部分泥晶发生重结晶,滩间海亚相;c. T738井,5 978.82 m,一间房组,粒屑灰岩,生屑、砂屑均较发育,分选中等,台内滩亚相;d. S94井,6 059.30 m,鹰山组,厚层状砾屑微晶灰岩,砾屑局部富集,圆状—次圆状,分选中等—差,砾屑大多水平排列,见多条近水平的缝合线,滩间海亚相;e. S96井,5 684.93 m,一间房组,泥晶灰岩,见水平纹层,台缘海亚相;f. AD4井,6 465.80 m,一间房组,亮晶砂屑生屑灰岩,砂屑生屑较发育,岩石非均匀性强,颗粒磨圆较好,分选一般,台缘滩亚相;g. AD4井,6 465.80 m,一间房组,亮晶砂屑生屑灰岩,见未充填裂缝,表皮鲕、生屑、砂屑发育,台缘滩亚相;h. S107井,6 324.09 m,一间房组,砾屑泥晶灰岩,砾屑大小不一,棱角明显,高角度排列,显示风暴沉积特征,淹没台地相;i. S116井,6 060.74 m,一间房组,含海绿石含生屑泥微晶灰岩,图中区域见1 mm左右的海绿石均匀分布,海绿石色调深,圆粒状,含少量泥质,淹没台地相。

图3 研究区沉积相典型岩心和镜下特征

Fig.3 Typical signs of different sedimentary environments in the study area

行、丘状、杂乱、前积、上超、透镜状反射等[22-23, 25, 28, 36-37]。

总体而言,研究区地震属性以中振幅为主,中—弱、弱振幅也分布较多,说明岩性相对均一。地震连续性以中—弱连续为主,弱、杂乱为辅,说明研究区以较浅的水体为主,如台内滩、台缘滩等,岩性横向变化快[23, 25, 36-37]。而研究区地震反射构型以席状、平行—亚平行、丘状、杂乱、前积、上超、透镜状反射为主;席状、平行—亚平行反射表明稳定、较低能的水体环境;丘状、杂乱反射表明岩性复杂,指示高能的水动力条件;前积反射表明沉积物可容纳空间逐渐增大,地层向陆地一侧进积;上超反射表明海平面迅速上升,沉积向陆地进积[22-23, 25, 36-37]。

通过地震相的纵横向追踪对比,建立了研究区沉积相带的地震响应模式(表2),中下奥陶统共可划分出11个典型的地震相,与沉积相带具有较明显的对应关系:

1)局限—半局限台地。局限—半局限台地相的地震响应主要有3种。席状、平行—亚平行反射、中—强振幅、中—高连续地震相(图4a)反映了滩间海亚相。亚平行反射、中—弱振幅、中—低连续地震相(图4b)和波状—杂乱反射、中—弱振幅、低连续

表 2　研究区地震反射特征与沉积环境对应关系

Table 2　Corresponding relationship between seismic reflection characteristics and sedimentary environment in the study area

序号	地震振幅	地震连续性	反射结构	沉积相	沉积亚相	典型实例
1	中—强振幅	中—高连续	席状、平行—亚平行反射		滩间海	图 4a
2	中—弱振幅	中—低连续	亚平行反射	局限—半局限台地	台内滩	图 4b
3	中—弱振幅	低连续	波状—杂乱反射		台内滩	图 4c
4	中—弱振幅	中等连续	席状、平行—亚平行反射		滩间海	图 4d
5	中—弱振幅	中—低连续	亚平行反射	开阔台地	台内滩	图 4e
6	弱振幅	低连续	波状—杂乱反射		台内滩	图 4f
7	中—弱振幅	低连续	席状、平行—亚平行反射		台缘海	图 4g
8	中—弱振幅	中—低连续	丘状—杂乱反射	台地边缘	台缘滩	图 4h
9	中—弱振幅	低连续	前积反射		台内滩	图 4i
10	中—强振幅	高连续	席状、平行—亚平行反射	淹没台地		图 4j
11	中—强振幅	中—高连续	上超反射	斜坡		图 4k、l

地震相(图 4c)反映了台内滩亚相，前者在研究区大面积分布，后者仅分布在研究区东部、南部的边缘。

2)开阔台地。开阔台地相的地震响应主要有 3 种。席状、平行—亚平行反射、中—弱振幅、中等连续地震相(图 4d)反映了滩间海亚相。亚平行反射、中—弱振幅、中—低连续地震相(图 4e)和波状—杂乱反射、弱振幅、低连续地震相(图 4f)反映了台内滩亚相，前者在研究区大面积分布，后者则预示着局部的礁滩体。

3)台地边缘。台地边缘相的地震响应主要有 3 种。席状、平行—亚平行反射、中—弱振幅、低连续地震相(图 4g)反映了台缘海亚相。丘状—杂乱反射、中—弱振幅、中—低连续地震相(图 4h)和前积反射、中—弱振幅、低连续地震相(图 4i)反映了台缘滩亚相，前者在研究区较多分布，后者主要分布于台地边缘向斜坡的过渡带。

4)淹没台地。主要表现为席状、平行—亚平行反射、中—强振幅、高连续地震相(图 4j)。

5)斜坡。斜坡相在研究区分布很少，主要表现为上超反射、中—强振幅、中—高连续地震相(图 4k、l)。

5　沉积体系时空展布特征及演化

研究显示，塔河地区中下奥陶统沉积环境以台地相为主[22-25, 27-28, 33-39]，时空展布差异明显(图 5)：纵向上，自蓬莱坝组至一间房组沉积水体逐渐加深，沉积环境由局限逐渐变开阔；横向上，蓬莱坝组至一间房组早期研究区主体以开阔台地、台地边缘为主，一间房组晚期研究区主体以台地边缘、淹没台地为主，向东、向南至研究区外部逐渐过渡为斜坡-盆地相，随着时代渐新，浅水区逐渐向西、向北迁移。

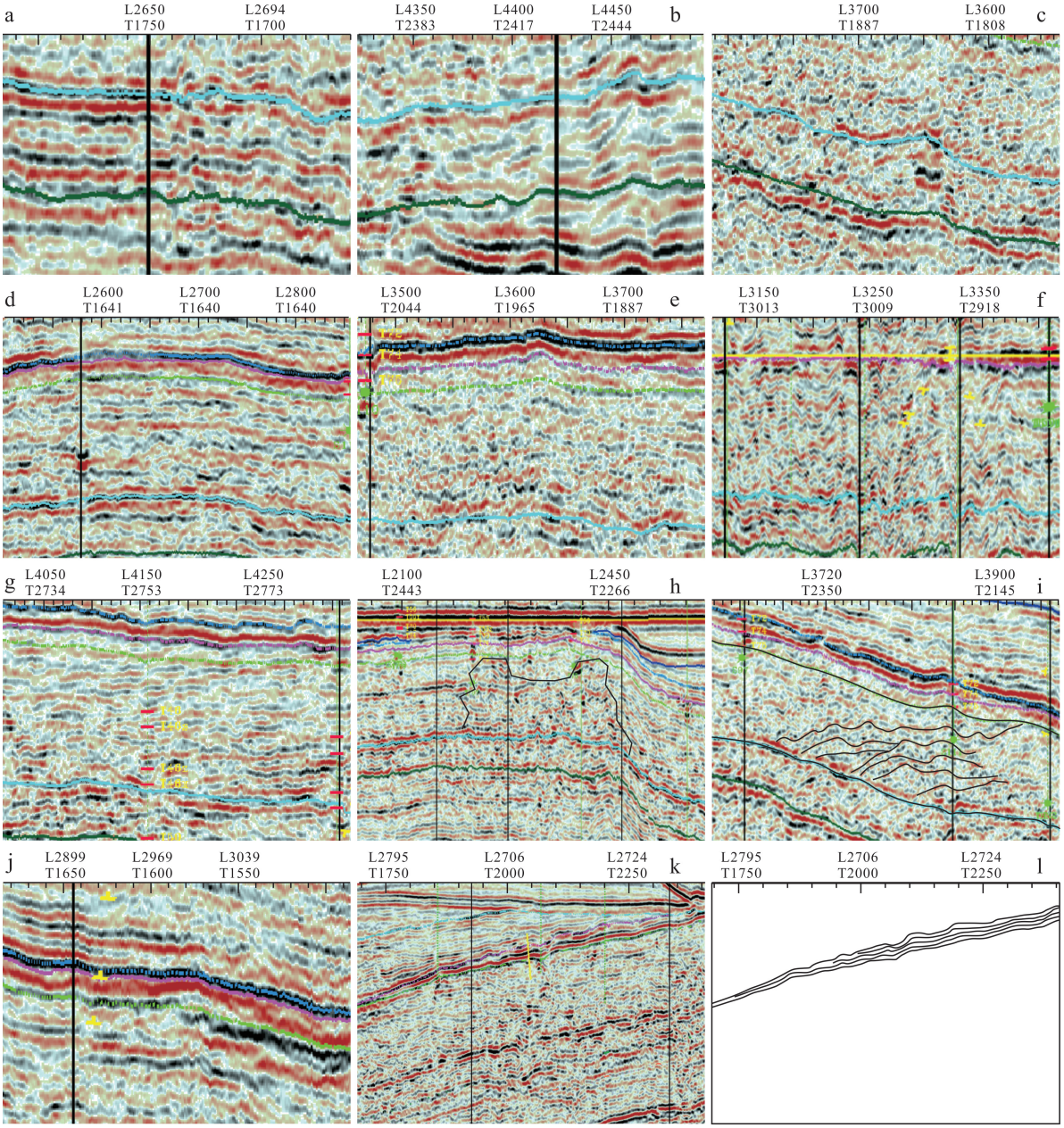
5.1　沉积体系纵向展布及演化

下奥陶统蓬莱坝组时，沉积环境延续了寒武纪的特征[24, 32-33]，岩性以泥晶灰岩、砂屑灰岩、藻灰岩、云质灰岩、灰质云岩为主，越往下白云质含量越高，其白云岩和过渡岩类的原岩多为泥晶灰岩、泥灰岩，塔河主体区沉积环境多为局限—半局限台地的滩间海、台内滩亚相(图 5a)。研究区钻遇蓬莱坝组中上部的井较多，但都是以云质灰岩夹灰质白云岩为特征的半局限台地，说明下奥陶统蓬莱坝组自下而上沉积水体逐渐加深，环境变得开阔。

向上至中下奥陶统鹰山组发生小规模海进，地层以亮晶砂屑灰岩、泥晶砂屑灰岩夹泥晶灰岩和泥灰岩为主，越向上白云质含量越低，沉积环境主要为台地相的台内滩、滩间海亚相(图 5b)。总体上，鹰山组中下部以半局限台地环境为主，向上生物灰岩逐渐增多，沉积环境逐渐变为开阔台地。

再向上至中奥陶统一间房组，进一步海侵，沉积水体快速上升，地层以亮晶砂屑灰岩、亮晶鲕粒灰岩、藻灰岩等为主，沉积环境由鹰山组开阔台地逐渐演化为一间房组早期的台地边缘、开阔台地(图 5c)，直至一间房组晚期的淹没台地(图 5d)。

自下奥陶统蓬莱坝组至中奥陶统一间房组，研究区总体上经历了蓬莱坝组局限台地相→半局限台地相→中下奥陶统鹰山组开阔台地相→中奥陶统一间房组台地边缘相→一间房组晚期、吐木休克组淹没台地相的演化过程[33-34, 37]。在这一演化中，沉积



a. 席状、平行—亚平行反射、中—强振幅、中—高连续地震相；b. 亚平行反射、中—弱振幅、中—低连续地震相；c. 波状—杂乱反射、中—弱振幅、低连续地震相；d. 席状、平行—亚平行反射、中—弱振幅、中等连续地震相；e. 亚平行反射、中—弱振幅、中—低连续地震相；f. 波状—杂乱反射、弱振幅、低连续地震相；g. 席状、平行—亚平行反射、中—弱振幅、低连续地震相；h. 丘状—杂乱反射、中—弱振幅、中—低连续地震相；i. 前积反射、中—弱振幅、低连续地震相；j. 席状、平行—亚平行反射、中—强振幅、高连续地震相；k. 上超反射、中—强振幅、中—高连续地震相；l. k图的局部素描图。L. 主测线；T. 联络测线。

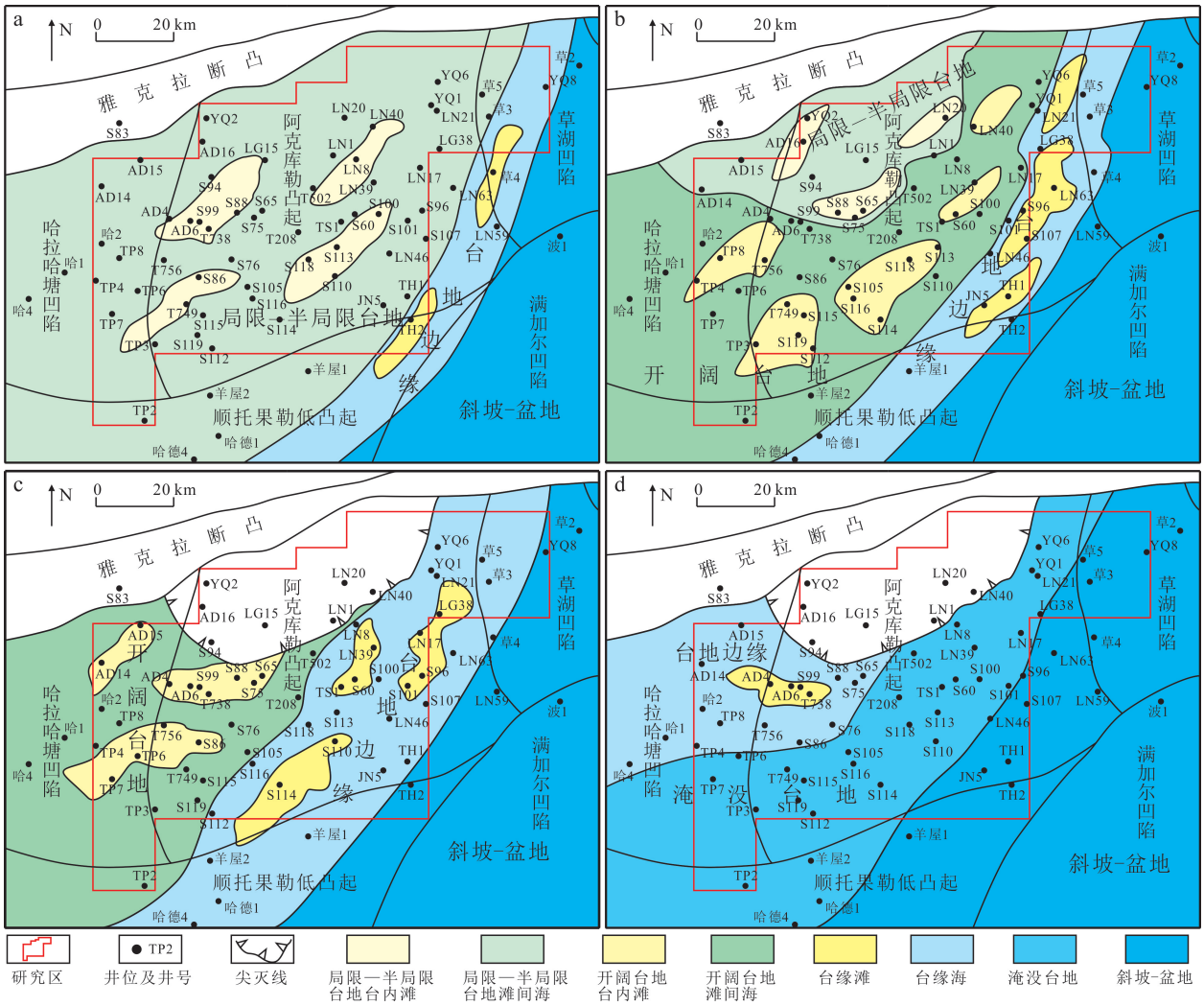
图4 研究区中下奥陶统典型地震反射特征

Fig.4 Typical seismic reflection characteristics of Middle and Lower Ordovician in the study area

水体由浅逐渐变深，水动力强度经历了较弱、强、弱的演变，构成了一个完整的海进序列。

5.2 沉积体系横向展布及演化

平面特征上，下奥陶统蓬莱坝组延续了寒武纪西台东盆的构造格局[33]，塔北地区由北向南、由西向东依次发育局限台地、台地边缘、斜坡(图5a)。此时，塔河主体区发育大面积的局限—半局限台地，部分地区有较高能的台内滩沉积，如LN8、S99井区。台地边缘环境主要分布于塔河的东部、南部，沿草2、草3、TH2等井呈狭长的呈近南北向的条带。



a. 蓬莱坝组；b. 鹰山组；c. 一间房组早期；d. 一间房组晚期。

图 5　研究区沉积环境演化图

Fig.5　Evolution diagram of sedimentary environment in the study area

而斜坡相主要分布于草湖凹陷中部至满加尔凹陷边缘，呈近南北向的向西突出的窄条状马蹄形分布[28, 33-34, 36-37]（图 5a），再往东则是盆地相的暗色泥岩沉积。

向上至中下奥陶统鹰山组，随着沉积水体逐渐加深，局限—半局限台地向北迁移[33-34, 37]，沉积体系的平面组合发生较大变化，由西北向东南依次发育开阔台地、台地边缘、斜坡、盆地。受古地形、构造等因素影响，局部地区仍然长时间发育半局限台地环境（图 5b），如临近北侧古陆地区。该时期台地边缘向北、向西短距离迁移，呈近南北向的窄条沿 LN21、LN63、LN46、羊屋 1 井一带分布，以发育高能的台缘滩为特征。这一带的西北侧为研究区主体，发育开阔台地环境，台内滩广泛发育，如 LN40、LN39、S118、S115 井区等。这一带的东南侧为斜坡、盆地相，主要分布于草湖凹陷中部至满加尔凹陷边缘，比起蓬莱坝组沉积期，分布范围向西、向北有所扩大。

再向上至中奥陶统一间房组，统一的塔西孤立台地逐渐演化成塔北、塔中两个单独的碳酸盐岩台地[32-33, 37]。沉积水体进一步加深，开阔台地向北、向西迁移[33-34, 37]（图 5c），研究区主体逐渐由开阔台地演变为台地边缘、淹没台地（图 5c、d）。

一间房组早期，台地边缘主要分布于研究区中东部，特别是草 5、LN17、LN46、JN5、羊屋 1、羊屋 2 等井的带状区域，台地边缘的宽度明显增加（图 5c），发育多个台内礁滩体，如 S60、S96、S114 井区等。这一带的西北侧是大面积的开阔台地环境，发

育多个台内礁滩体,如S86、S75等。斜坡相区主要分布于研究区东部、草湖凹陷、满加尔凹陷。

一间房组晚期,海侵规模进一步扩大,研究区发育淹没台地和台地边缘环境。淹没台地分布于研究区的主体部位,如S112、S114、YQ6等井区;台地边缘分布于研究区的北部、西部,如TP8、S88、AD4等井区,部分区域后期被剥蚀;开阔台地和局限台地可能分布于雅克拉断凸,大部分地层可能被剥蚀。而斜坡、盆地相的范围比前期进一步扩大,不仅涵盖了草湖凹陷、满加尔凹陷,而且包括了研究区的东部区域,如LN59、TH2等井。

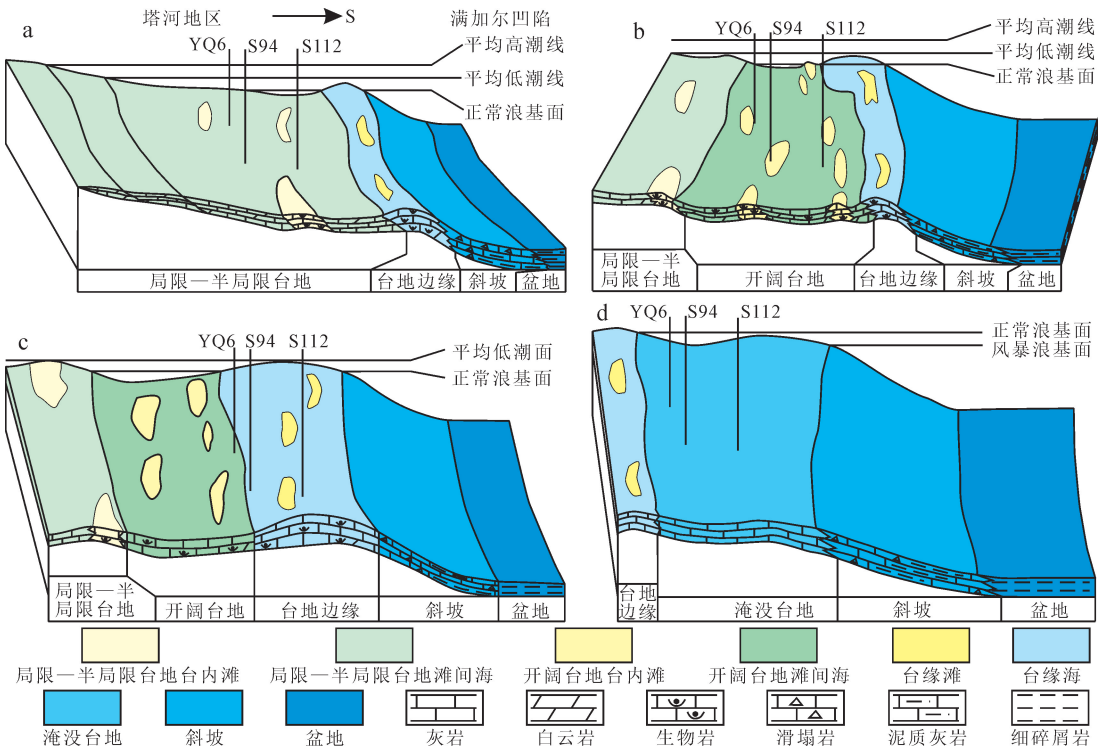
6 沉积演化模式

与塔中地区相比[32-33],早中奥陶世塔河地区构造隆升并不强烈,这一时期以发育一套完整的向上变深的海进序列为特征,形成了自蓬莱坝组至一间房组弱缓坡台地→弱镶边台地→淹没台地的演化模式[11]。

蓬莱坝组沉积前,塔里木盆地发育大面积的局限台地、蒸发台地[31]。蓬莱坝组沉积时,海水由南向北逐渐海侵,由下而上水体逐渐宽阔、能量逐渐升高、水深逐渐加大。整体上,自满加尔凹陷向北至塔河地区,蓬莱坝组沉积环境表现为盆地→斜坡→台地边缘→局限—半局限台地→陆地的平面组合模式[33-34, 37](图6a)。研究区蓬莱坝组下部云灰岩段代表了局限台地环境,而上部云化减少,代表了半局限台地环境,整体反映了海平面上升、陆地后退、台地向北迁移的趋势。

鹰山组沉积时,随着满加尔拗拉槽的进一步发展,海盆进一步扩大,塔北地区海水逐渐向西、向北海侵,研究区海平面逐渐上升,水动力增强,碳酸盐岩台地进一步向北发展[24-25, 33-34, 37],整体上沉积相带向北推进了数十千米。自满加尔凹陷向北至塔河地区,沉积环境表现为盆地→斜坡→台地边缘→开阔台地→局限—半局限台地的平面组合模式[33-34, 37],研究区主要发育开阔台地、半局限台地环境(图6b)。

一间房组沉积初期,海水进一步向北海侵,沉积体系继续向北发展。该时期沉积相平面组合模式与鹰山组相似,只是研究区可能小幅度隆升,造成沉积



a. 蓬莱坝组;b. 鹰山组;c. 一间房组早期;d. 一间房组晚期。

图6 研究区早中奥陶世沉积演化模式图

Fig.6 Sedimentary evolution model of Early and Middle Ordovician in the study area

水深下降，发育大面积的台地边缘环境（图 6c），在平面上台地边缘的宽度可达 30～50 km。一间房组晚期，随着周缘造山活动加剧，盆地南北向构造挤压作用加强[32]，海盆进一步扩大，造成研究区持续海侵，水体继续加深，沉积环境由台地边缘变为淹没台地。自满加尔凹陷向北至塔河地区，沉积环境表现为盆地→斜坡→淹没台地的平面组合模式（图 6d）。

7　结论

1）研究区中下奥陶统主要发育 5 种沉积环境，蓬莱坝组以局限—半局限台地环境为主，鹰山组以半局限台地、开阔台地环境为主，一间房组以开阔台地、台地边缘、淹没台地环境为主。

2）研究区中下奥陶统沉积环境演化时空差异明显：纵向上，自蓬莱坝组至一间房组沉积水体逐渐加深，沉积环境由局限逐渐变开阔；横向上，研究区主体以开阔台地、台地边缘为主，向东、向南至研究区外部逐渐过渡为斜坡、盆地相，同时随着时代渐新，浅水区逐渐向西、向北迁移。

3）研究区总体上经历了下奥陶统蓬莱坝组局限台地相→半局限台地相→中下奥陶统鹰山组开阔台地相→中奥陶统一间房组台地边缘相→一间房组晚期、吐木休克组淹没台地相的演化过程，形成了自蓬莱坝组至一间房组弱缓坡台地→弱镶边台地→淹没台地的演化模式。

参考文献（References）：

[1] 赵宗举，范国章，吴兴宁，等. 中国海相碳酸盐岩的储层类型、勘探领域及勘探战略[J]. 海相油气地质，2007，12(1)：1－11.
Zhao Zongju，Fan Guozhang，Wu Xingning，et al. Reservoir Types，Exploration Domains and Exploration Strategy of Marine Carbonates in China[J]. Marine Origin Petroleum Geology，2007，12(1)：1－11.

[2] 马永生，何登发，蔡勋育，等.中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J].岩石学报，2017，33(4)：1007－1020.
Ma Yongsheng，He Dengfa，Cai Xunyu，et al. Distribution and Fundamental Science Questions for Petroleum Geology of Marine Carbonate in China[J]. Acta Petrologica Sinica，2017，33(4)：1007－1020.

[3] 刘文汇.中国早古生代海相碳酸盐岩层系油气地质研究进展[J].矿物岩石地球化学通报，2019，38(5)：871－880.
Liu Wenhui. Advances in Oil and Gas Geology of the Early Paleozoic Marine Carbonate Strata in China[J]. Bulletin of Mineralogy，Petrology and Geochemistry，2019，38(5)：871－880.

[4] 李阳，薛兆杰，程喆，等.中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J].中国石油勘探，2020，25(1)：45－57.
Li Yang，Xue Zhaojie，Cheng Zhe，et al. Progress and Development Directions of Deep Oil and Gas Exploration and Development in China[J]. China Petroleum Exploration，2020，25(1)：45－57.

[5] 漆立新.塔里木盆地下古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J].石油与天然气地质，2014，35(6)：771－779.
Qi Lixin. Exploration Practice and Prospects of Giant Carbonate Field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology，2014，35(6)：771－779.

[6] 李阳.塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征[J].中国石油大学学报（自然科学版），2012，36(1)：1－7.
Li Yang. Ordovician Carbonate Fracture-Cavity Reservoirs Identification and Quantitative Characterization in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum（Edition of Natural Science），2012，36(1)：1－7.

[7] 漆立新，云露.塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素 [J].石油与天然气地质，2010，31(1)：1－12.
Qi Lixin，Yun Lu. Development Characteristics and Main Controlling Factors of the Ordovician Carbonate Karst in Tahe Oilfield [J]. Oil & Gas Geology，2010，31(1)：1－12.

[8] 何治亮，彭守涛，张涛.塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合-联合成因机制[J].石油与天然气地质，2010，31(6)：743－752.
He Zhiliang，Peng Shoutao，Zhang Tao. Controlling Factors and Genetic Pattern of the Ordovician Reservoirs in the Tahe Area，Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology，2010，31(6)：743－752.

[9] 何治亮，魏修成，钱一雄，等.海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测[J].石油与天然气地质，2011，32(4)：489－498.
He Zhiliang，Wei Xiucheng，Qian Yixiong，et al. Forming Mechanism and Distribution Prediction of Quality Marine Carbonate Reservoirs[J]. Oil & Gas Geology，2011，32(4)：489－498.

[10] 彭守涛，何治亮，丁勇，等.塔河油田托甫台地区奥陶系一间房组碳酸盐岩储层特征及主控因素[J].石油

实验地质,2010,32(2):108-114.
Peng Shoutao, He Zhiliang, Ding Yong, et al. Characteristics and Major Controlling Factors of Carbonates Reservoir in the Middle Ordovician Yijianfang Formation, Tuofutai Area, Tahe Oilfield [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(2): 108-114.

[11] 李忠,黄思静,刘嘉庆,等.塔里木盆地塔河奥陶系碳酸盐岩储层埋藏成岩和构造-热流体作用及其有效性[J].沉积学报,2010,28(5):969-979.
Li Zhong, Huang Sijing, Liu Jiaqing, et al. Buried Diagenesis, Structurally Controlled Thermal-Fluid Process and Their Effect on Ordovician Carbonate Reservoirs in Tahe, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 969-979.

[12] 赫俊民,王小垚,孙建芳,等.塔里木盆地塔河地区中—下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征及主控因素[J].石油与天然气地质,2019,40(5):1022-1030.
Hao Junmin, Wang Xiaoyao, Sun Jianfang, et al. Characteristics and Main Controlling Factors of Natural Fractures in the Lower-to-Middle Ordovician Carbonate Reservoirs in Tahe Area, Northern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1022-1030.

[13] 韩强,云露,蒋华山,等.塔里木盆地顺北地区奥陶系油气充注过程分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(3):645-658.
Han Qiang, Yun Lu, Jiang Huashan, et al. Marine Oil and Gas Filling and Accumulation Process in the North of Shuntuoguole Area in Northern Tarim Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 645-658.

[14] 李开开,蔡春芳,蔡俪璐,等.塔河地区下古生界热液流体及储层发育主控因素探讨:以S88和TS1井为例[J].石油实验地质,2010,32(1):46-51.
Li Kaikai, Cai Chunfang, Cai Liulu, et al. Hydrothermal Fluid Activities and Main Controlling Factors of Deep Reservoir Development in the Lower Paleozoic of the Tahe Oilfield: Taking Wells S88 and TS1 as Examples[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(1): 46-51.

[15] 朱东亚,孟庆强,金之钧,等.复合成因碳酸盐岩储层及其动态发育过程:以塔河地区奥陶系碳酸盐岩为例[J].天然气地球科学,2012,23(1):26-35.
Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Jin Zhijun, et al. Carbonate Reservoir Rock of Composite Genesis and Its Dynamic Developing Process: An Example from Tahe Carbonate Reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 26-35.

[16] 王昱翔,顾忆,傅强,等.顺北地区中下奥陶统埋深碳酸盐岩储集体特征及成因[J].吉林大学学报(地球科学版),2019,49(4):932-946.
Wang Yuxiang, Gu Yi, Fu Qiang, et al. Characteristics and Genesis of Deep Carbonate Reservoirs in Shunbei Area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(4): 932-946.

[17] Xu W W, Gu Q X. Lower-Middle Ordovician Cave-Reservoir Characters and Dominant Factors in Southern Tahe Oil Field [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1010/1011/1012: 1408-1412.

[18] 金燕林,王金柱.塔河油田T738井区奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征及储层控制因素分析[J].石油地质与工程,2020,34(4):7-11.
Jin Yanlin, Wang Jinzhu. Karst Development Characteristics and Reservoir Controlling Factors of Ordovician Carbonate Rocks in T738 Well Area of Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(4): 7-11.

[19] 范卓颖,林承焰,鞠传学,等.塔河油田二区奥陶系优势储集体特征及控制因素[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(1):34-47.
Fan Zhuoying, Lin Chengyan, Ju Chuanxue, et al. Characteristics of Main Ordovician Reservoir Rocks in Block Two of Tahe Oilfield [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(1): 34-47.

[20] 黄太柱,陈惠超,吕海涛,等.塔河油田鹰山组内幕油气藏勘探与评价[R].乌鲁木齐:中石化西北油田分公司,2017.
Huang Taizhu, Chen Huichao, Lü Haitao, et al. Exploration and Evaluation of Insider Oil and Gas Reservoirs in Yingshan Formation of Tahe Oilfield [R]. Urumqi: Sinopec Northwest Oilfield Company, 2017.

[21] 杨孝群.塔里木盆地塔北地区奥陶系碳酸盐岩高精度层序格架及内幕岩溶储层发育机制[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
Yang Xiaoqun. The High Frequency Sequence Framework and Interstratum Karst Reservoirs Development Mechanism of Lower-Middle Ordovician in Tabei Area, Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.

[22] 张舒扬.塔里木盆地塔河地区奥陶系蓬莱坝组层序地

层与沉积相研究[D].北京：中国地质大学(北京)，2016.
Zhang Shuyang. Research on Sequence Stratigraphic and Sedimentary Facies of Ordovician Penglaiba Formation in Tahe Area, Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

[23] 翁立锋.塔里木盆地奥陶系下统蓬莱坝组沉积相研究[D].成都：西南石油大学，2017.
Weng Lifeng. Study on Sedimentary Facies of Penglaiba Formation of Lower Ordovician in Tarim Basin [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

[24] 刘文，李永宏，张涛，等.塔河油田奥陶系碳酸盐岩沉积相及地层学研究[J].石油实验地质，2002，24(2)：104－109.
Liu Wen, Li Yonghong, Zhang Tao, et al. Study on the Sedimentary Facies and Sequence Stratigraphy of the Ordovician Carbonate Rock in Tahe Oilfield [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(2): 104－109.

[25] 郁文谊.塔里木盆地塔河地区奥陶系鹰山组层序地层与沉积相研究 [D].北京：中国地质大学(北京)，2016.
Yu Wenyi. Research on Sequence Stratigraphic and Sedimentary Facies of Ordovician Yingshan Formation in Tahe Area, Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

[26] 史江涛，郝君明，王小雷.塔河地区奥陶系鹰山组储层特征及其主控因素[J].吉林大学学报(地球科学版)，2022，52(2)：348－362.
Shi Jiangtao, Hao Junming, Wang Xiaolei. Reservoir Characteristics and Controlling Factors of Lower-Middle Ordovician Yingshan Formation in Tahe Area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 348－362.

[27] 谷雨.塔河油田主区中奥陶统一间房组沉积微相特征与展布[D].北京：中国地质大学(北京)，2020.
Gu Yu. Sedimentary Microfacies Characteristics and Distribution of the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Tahe Oilfield [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.

[28] 曹康.塔里木盆地奥陶系中统一间房组沉积相研究[D].成都：西南石油大学，2017.
Cao Kang. Study on Sedimentary Facies of Yijianfang Formation of Middle Ordovician in Tarim Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

[29] 侯明才，万梨，傅恒，等.塔河南盐下地区中奥陶统一间房组沉积环境分析[J].成都理工大学学报(自然科学版)，2008，35(6)：601－609.
Hou Mingcai, Wan Li, Fu Heng, et al. Study on the Sedimentary Environment of the Middle Ordovician Yijianfang Formation in the South of Tarim River Area, Xinjiang, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(6): 601－609.

[30] 刘嘉庆.塔里木盆地塔河-塔中上奥陶统良里塔格组碳酸盐岩储层沉积成岩作用及其差异演化[D].北京：中国科学院地质与地球物理研究所，2011.
Liu Jiaqing. Distinct Sedimentary-Diagenesis of the Lianglitag Formation Carbonates Between Tahe and Tazhong Regions in Tarim Basin and Their Influence on Reservoir Evolution[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2011.

[31] 赵宗举，罗家洪，张运波，等.塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理[J].石油学报，2011，32(6)：37－48.
Zhao Zongju, Luo Jiahong, Zhang Yunbo, et al. Lithofacies Paleogeography of Cambrian Sequences in the Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 37－48.

[32] 林畅松，李思田，刘景彦，等.塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化[J].岩石学报，2011，27(1)：210－218.
Lin Changsong, Li Sitian, Liu Jingyan, et al. Tectonic Framework and Paleogeographic Evolution of the Tarim Basin During the Paleozoic Major Evolutionary Stages[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 210－218.

[33] 赵宗举，吴兴宁，潘文庆，等.塔里木盆地奥陶纪层序岩相古地理[J].沉积学报，2009，27(5)：39－56.
Zhao Zongju, Wu Xingning, Pan Wenqing, et al. Sequence Lithofacies Paleogeography of Ordovician in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 39－56.

[34] 俞仁连.阿克库勒凸起加里东期构造演化与岩溶作用研究[D].北京：中国科学院地质与地球物理研究所，2006.
Yu Renlian. Study on Structural Evolution and Karstification in Caledon in Akekule Bulge, Tarim Basin [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2006.

[35] 王小敏.塔里木盆地中下奥陶统层序-岩相古地理和储层预测[D].北京：中国地质大学(北京)，2012.
Wang Xiaomin. Sequence-Lithofacies Paleogeography and Reservoir Prediction of Middle-Lower Ordovician

in Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2012.

[36] 周吉羚.塔北地区奥陶系碳酸盐岩层序、沉积相研究[D].成都:成都理工大学,2016.
Zhou Jiling. The Study on the Sequence, the Sedimentary Facies of the Ordovician Carbonate Rocks in the North of the Tarim Basin[D].Chengdu: Chengdu University of Technology,2016.

[37] 吴兴宁,斯春松,俞广,等.塔里木盆地奥陶纪岩相古地理恢复及其油气勘探意义[J].海相油气地质,2012,17(3):9-17.
Wu Xingning, Si Chunsong, Yu Guang, et al. Reconstruction of Ordovician Lithofacies Paleogeography and Petroleum Prospecting Significance in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology,2012,17(3):9-17.

[38] 吴丰,代槿,姚聪,等.塔河油田奥陶系一间房组与鹰山组断溶体发育模式解剖[J].断块油气田,2022,29(1):33-39.
Wu Feng, Dai Jin, Yao Cong, et al. Developmental Mode Analysis of the Fault-Karst Reservoir in Yijianfang Formation and Yingshan Formation of Ordovician in Tahe Oilfield[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2022,29(1):33-39.

[39] 汪彦,高济元,杨德彬,等.海西早期大型树枝状岩溶暗河发育条件与地质模式:以塔里木盆地塔河油田B94井区为例[J]. 断块油气田,2023,30(5):758-769.
Wang Yan, Gao Jiyuan, Yang Debin, et al. Development Conditions and Geological Models of Large Dendritic Kart Conduit in Early Hercynian: A Case Study of B94 Well Block of Tahe Oifield, Tarim Basin[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2023,30(5):758-769.